不同固液比例饲喂模式对断奶前后犊牛营养物质代谢及瘤胃发酵的影响

马俊南[1] 刁其玉[1] 齐志国[2] 周凯迪[3] 杨春涛[1] 毕研亮[1] 屠 焰[1*]

（1.中国农业科学院饲料研究所，农业部饲料生物技术重点实验室，奶牛营养学北京市重点实验室，北京 100081；2.北京市畜牧总站，北京 100110；3.北京农学院，北京 102206）

摘 要：本试验旨在研究断奶前后犊牛在不同固液比例饲喂模式下，对营养物质代谢及其瘤胃发酵的异同，从而探索基于不同饲喂模式下的犊牛断奶方式。试验选用 7 日龄荷斯坦公犊牛 36 头，随机分成 3 组，各组采用相同原料组成、相同营养成分的代乳粉和颗粒料。在总干物质饲喂量保持一致的情况下，改变固液饲料饲喂比例，形成 3 种饲喂模式组：高液体饲料比例（HL）组，28~56 日龄内，颗粒料:代乳粉保持在 1:2，56 日龄断奶；对照（LS）组 28~56 日龄内，颗粒料:代乳粉从 1:2 逐步降低到 1:1，56 日龄断奶；高固体饲料比例（HS）组，28~42 日龄内，颗粒料:代乳粉从 1:2 低至 1:0，并于 42 日龄断奶。试验期 77 d。分别于犊牛 28、42、56 和 84 日龄采集瘤胃液，35 和 63 日龄进行断奶前后消化代谢试验。结果表明:断奶前，与 HS 组相比，HL、LS 组犊牛总能代谢率相对较高，但差异不显著（$P>0.05$）；断奶后，HS 组消化能代谢率、氮利用率及氮的生物学价值较 HL 组显著提高（$P<0.05$）。与 HL 组相比，HS 组 84 日龄瘤胃液微生物蛋白含量显著提高（$P<0.05$）。3 组间瘤胃液氨态氮浓度无显著差异（$P>0.05$）。84 日龄时，HS 组犊牛瘤胃液总挥发性脂肪酸浓度和丁酸比例显著高于 HL 组（$P<0.05$），各组间丙酸、戊酸比例无显著差异（$P>0.05$）。综上可得，适量增加固体饲料饲喂比例有助于改善断奶前后犊牛瘤胃发酵环境，促进瘤胃微生物蛋白的合成，提高断奶后犊牛饲粮能量代谢率、氮的生物学价值及氮利用率；采用高固体饲料饲喂模式，犊牛在 42 日龄固体饲料采食量达到 1.0 kg/d 实施断奶具有一定优势。

提高饲粮中营养物质的消化利用率。

关键词：犊牛；固液饲料比例；微生物蛋白；营养物质代谢；瘤胃发酵

中图分类号：S823

营养物质的吸收利用与瘤胃发育相互影响，二者也对犊牛时期及成年后生产性能具有重

收稿日期：2016-12-05

基金项目：奶牛产业技术体系北京市创新团队；国家科技支撑计划课题“华北农区及北方大城市奶牛健康养殖生产技术集成及产业化示范”（2012BAD12B06）

作者简介：马俊南（1990-），女，河南周口人，硕士研究生，研究方向为反刍动物营养。E-mail：manan014@163.com

*通信作者：屠 焰，研究员，博士生导师，E-mail： tuyan@caas.cn

要的意义。而饲料作为动物营养物质的主要来源，其组成及物理形态对犊牛瘤胃的发育至关重要。犊牛的饲料包括液体和固体 2 种形态。其中液体饲料主要包括鲜奶及代乳粉，犊牛采食液体饲料时由条件反射引导食管沟闭合，使乳液直接进入皱胃，形成凝块，经消化酶作用，进入肠道吸收[1]，为断奶前犊牛的生长提供主要的营养物质；固体饲料则直接进入到瘤胃，参与瘤胃的生长发育，包括固体饲料的采食刺激、微生物发酵系统的完善、发酵及吸收机制的协调等一系列过程[2]，然后再进入皱胃和肠道，在瘤胃中发酵产生的挥发性脂肪酸（VFA）直接刺激瘤胃发育，也是犊牛断奶后及成年时期良好营养物质代谢的前提[3]。因此，固液饲料的相对饲喂量不同会对犊牛生长发育产生影响。研究表明，固体饲料饲喂量缺乏会导致瘤胃角质化不全、发育迟缓，最终影响营养物质的吸收[4]。犊牛对固体饲料采食量的增加可以加快瘤胃对饲料的发酵速率、发酵程度以及对 VFA 的吸收和代谢[5]。此外，液体饲料饲喂量过少也会引起皱胃病变等疾病[6]。犊牛早期断奶与固液体饲料采食量息息相关，我国规模化奶牛场的通用规则是：犊牛固体饲料采食量连续 3 d 达到 1.0 kg/d，或是在液体饲料饲喂至 8 周左右给犊牛断奶[7]，然而这些饲喂模式仍然会使断奶犊牛产生应激反应，进而造成犊牛疾病及生长发育迟缓，对生产带来损失，更不利于后备牛的早期培育。因此，本试验在保证总干物质采食量（DMI）一致的前提下，改变固液饲料饲喂比例，进而形成了不同的断奶方式，旨在探讨不同固液比例饲喂模式对断奶前后犊牛能量和氮代谢、瘤胃微生物蛋白（MCP）合成以及瘤胃发酵的影响，为犊牛培育中合理的固液饲料饲喂模式及断奶方法提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 试验时间及地点

动物饲养试验于 2015 年 9 月至 2015 年 12 月在中国农业科学院中试基地进行。试验期 77 d。

1.2 试验设计

选用自然分娩、初生重未（36.0±2.5） kg、饲喂足量初乳的（7±2）日龄中国荷斯坦公犊 36 头。采用单因素随机设计，随机分为 3 个组，每组 12 头。犊牛 7 日龄开始全部采食液体代乳粉，21 日龄开始训练采食固体颗粒料，21~27 日龄为试验过渡期。28 日龄时代乳粉 DMI 为体重的 1.2%、颗粒料饲喂量达到 200 g/d[8]。

对照（LS）组，犊牛参照目前规模化牛场的饲喂方案，固体颗粒料饲喂量每周增加量为 200 g/d，液体饲料饲喂量为体重的 12.5%，随体重增长而逐步调整。在 28~56 日龄期间，固体颗粒料:液体饲料由 1:2 降低为 1:1；56 日龄时，固体饲料采食量达到 1 kg/d 左右，进行断奶。

高液体饲料比例（HL）组，饲喂以液体代乳粉为主，总 DMI 与 LS 组保持一致，但其中固体颗粒料饲喂量每周增加量为 100 g/d，其余为液体饲料。犊牛在 28~56 日龄期间，固体颗粒料:液体饲料为 1:2；在 56 日龄时进行断奶，此时固体饲料采食量仅为 0.6 kg 左右。

高固体饲料比例（HS）组，饲喂以固体颗粒料为主，总 DMI 与 LS 组保持一致，但其中固体颗粒料饲喂量每周增加量为 400 g/d，其余为液体饲料。28~42 日龄期间，固体颗粒料:液体饲料由 1:2 降低至 1:0；42 日龄时固体饲料采食量达到 1.0 kg 左右，进行断奶。

犊牛代乳粉和颗粒料，采用 ZL201210366241.9 配方生产，其营养水平[干物质（DM）基础]为：DM 95.13%、有机物（OM）91.81%、粗蛋白质（CP）21.88%、粗脂肪（EE）12.17%、中性洗涤纤维（NDF）4.03%、酸性洗涤纤维（ADF）2.29%、钙（Ca）1.17%、磷（P）0.58%、总能（GE）18.49 MJ/kg。代乳粉为粉末，颗粒料制粒温度 50 ℃，颗粒直径 8 mm。

1.3 饲养管理

代乳粉乳液的配制，用煮沸后冷却到 50~60 ℃的热水按干物质（DM）占 12.5%的比例冲泡成乳液，待温度降至 40 ℃左右饲喂犊牛，每天 2 次饲喂（08:00 和 16:00），采用带有奶嘴的悬挂式奶桶饲喂。

犊牛采用犊牛岛单独饲养，每个犊牛岛占地面积为 1.6 m×3.6 m。试验期饲料供给量根据每头犊牛采食情况计算。提供干净、充足水源。

1.4 消化代谢试验

每组选取接近平均体重的 6 头健康犊牛，采取全收粪尿法分别于断奶前（35 日龄）和断奶后（63 日龄）利用消化代谢笼（专利号 ZL201420358189.7）进行犊牛消化代谢试验。试验期均为 7 d，其中预试期 3 d，正试期 4 d。记录每头犊牛每天采食量、排粪量和排尿量，采集粪尿样品。

1.5 样品采集与测定

1.5.1 饲料样品

试验中采集具有代表性的饲料样品，依照AOAC(2000)[9]的方法测定其营养成分含量，其中：CP含量以KDY-9830全自动凯氏定氮仪测定；EE含量采用ANKOM-XT15i全自动脂肪分析仪测定；GE以PARR-6400全自动氧弹量热仪测定；同时采用张丽英[10]的方法测定OM、NDF、ADF、Ca和P含量。

1.5.2 消化代谢试验样品

消化代谢试验的正试期中，每天采集日粪便总量的10%作为混合样品，每100 g鲜粪加入10%的稀硫酸10 mL固氮。连续收集每头犊牛日排尿量的1%作为尿样，用10%稀硫酸调整尿样使pH≤3。正试期每天采集具有代表性的饲料样品。收集的饲料、粪、尿样品于-20 ℃冷冻保存待测。饲粮样DM、CP含量和GE，粪样中DM、CP含量和粪能及粪氮排出量，尿样中尿能、尿氮排出量测定参考AOAC(2001)[9]中方法进行测定，试验仪器如上所述。计算饲粮消化能、代谢能、GE表观消化率、GE代谢率和消化能代谢率，公式如下：

消化能=摄入GE－粪能；

代谢能=摄入GE－粪能－尿能－甲烷能；

GE表观消化率=消化能/摄入GE；

GE代谢率=代谢能/摄入GE；

消化能代谢率=代谢能/消化能。

式中：甲烷能按GE的8%[11]计算。

1.5.3 瘤胃液样品

每组选取接近组平均体重的6头犊牛，分别于28、42、56和84日龄晨饲后2 h，采用灭菌口腔导管采集瘤胃内容物100 mL，4层纱布过滤后，立即用便携式pH计（testo-206-pH2）测定瘤胃液pH，然后分装于10 mL灭菌离心管中，放入液氮带回实验室，-80 ℃保存待测。瘤胃液4 ℃解冻，取上清液1 mL，加25%偏磷酸溶液0.3 mL，振荡3～5 s混匀后，静置30 min，15 000×*g*离心15 min后，取上清液0.5 mL。瘤胃液中VFA浓度参照Cao等[12]方法测定；氨态氮（NH_3-N）浓度采用靛酚比色法[13]测定；MCP含量参照Makkar等[14]的方法测定。

1.6 统计分析

以SAS 9.2软件进行统计。除消化代谢试验中能量与氮的数据利用one-way ANOVA模

型进行分析外，其他数据利用 MIXED 模型进行分析。差异显著（P<0.05）时采用最小显著差数法（least significant difference，LSD）进行比较。

one-way ANOVA 模型为:

$Y_{ij}=\mu+T_i+\varepsilon_{ij}$。

式中:μ 为平均值；T 为分组（i=1，2，3），固定效应；ε 为残差；j=1，2，3，…，12（犊牛）。

MIXED 模型为:

$$Y_{ijk}=\mu+T_i+D_j+TD_{ij}+C(T)_{ik}+\varepsilon_{ijk}。$$

式中：μ 为平均值；T 为分组（i=1，2，3），固定效应；D 为日龄（j=35，63），固定效应；C 为犊牛（k=1，2，3，…，12），随机效应；ε 为残差。

2 结果与分析

2.1 犊牛采食量

由表 1 可知，断奶前，不同固液比例对犊牛总 DMI 未产生显著性影响（P>0.05）。断奶后，HL 组犊牛总 DMI 显著低于其他 2 组（P<0.05）。

表 1 不同固液比例饲喂模式对犊牛总干物质采食量的影响(干物质基础)

Table 1 Effects of feed patterns of different solid and liquid feed ratios on total DMI of calves (DM basis，n=18)

g/d

项目 Items	组别 Groups			SEM	固定效应 P 值 P-values of fixed effects		
	HL	LS	HS		组别 Group	日龄 Days of age	组别×日龄 Group×days of age
断奶前 Pre-weaning	900.43	887.54	859.41	8.904	0.667	<0.001	0.728
断奶后 Post-weaning	1 798.77^{b}	1 959.01^{a}	2 043.51^{a}	4.742	0.036		

同行数据肩标不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。下表同。

In the same row, values with different small letter superscripts mean significant difference (P<0.05). The same as below.

2.2 犊牛能量代谢

由表 2 可知，断奶前，与 LS 组相比，HL 组饲喂模式有减少粪能（P=0.081）的趋势，同时 HL 组 GE 表观消化率显著提高（P<0.05）。断奶后，与 HL 组相比，HS 组通过显著降低尿能（P<0.05），从而显著提高了消化能代谢率（P<0.05），而 LS 组与 HL 组间消化能

代谢率无显著差异（P＞0.05）。

表 2　不同固液比例饲喂模式对犊牛能量消化代谢的影响（干物质基础）

Table 2　Effects of feed patterns of different solid and liquid feed ratios on energy digestion and metabolism of calves (DM basis, n=18)

项目 Items	组别 Groups HL	LS	HS	SEM	P 值 P-value
断奶前 Pre-weaning					
摄入总能 GE intake/［MJ/(kg $W^{0.75}$ d)］	1.01	0.99	0.92	0.017	0.065
粪能 Fecal energy/［MJ/(kg $W^{0.75}$·d)］	0.13	0.22	0.17	0.017	0.081
尿能 Urine energy/［MJ/(kg $W^{0.75}$ d)］	0.08	0.07	0.06	0.004	0.431
消化能 Digestible energy/［MJ/(kg $W^{0.75}$ d)］	0.87	0.77	0.75	0.026	0.120
代谢能 Metabolizable energy/［MJ/(kg $W^{0.75}$ d)］	0.79	0.70	0.69	0.027	0.228
总能表观消化率 Apparent digestibility of GE/%	86.61^{a}	77.39^{b}	81.57^{ab}	0.018	0.013
总能代谢率 Metabolizability of GE/%	78.78	70.14	74.69	0.019	0.202
消化能代谢率 Metabolizability of DE/%	90.91	90.56	91.55	0.006	0.835
断奶后 Post-weaning					
摄入总能 GE intake/［MJ/(kg $W^{0.75}$ d)］	1.18	1.21	1.18	0.010	0.358
粪能 Fecal energy/［MJ/(kg $W^{0.75}$·d)］	0.15	0.15	0.16	0.005	0.526
尿能 Urine energy/［MJ/(kg $W^{0.75}$ d)］	0.07^{a}	0.06^{ab}	0.04^{b}	0.005	0.023
消化能 Digestible energy/［MJ/(kg $W^{0.75}$ d)］	1.04	1.06	1.02	0.011	0.356
代谢能 Metabolizable energy/［MJ/(kg $W^{0.75}$ d)］	0.87	0.90	0.88	0.011	0.423
总能表观消化率 Apparent digestibility of GE/%	87.53	87.41	86.36	0.004	0.457
总能代谢率 Metabolizability of GE/%	73.36	74.44	74.69	0.005	0.593
消化能代谢率 Metabolizability of DE/%	83.79^{b}	85.13^{ab}	86.48^{a}	0.004	0.035

2.3 犊牛氮消化代谢

由表 3 可知，断奶前，HL 组较 LS 和 HS 组显著提高了氮利用率和沉积氮（P＜0.05）；断奶后，通过降低尿氮排出量（P=0.073）及总排出氮（P＜0.05），HS 和 LS 组氮沉积和氮利用率较 HL 组显著提高（P＜0.05）；另外，HS 组犊牛断奶后氮的生物学价值显著高于 HL 组（P＜0.05），与 LS 组差异不显著（P＞0.05）；然而，3 组断奶前后犊牛尿氮排出量和吸收氮无显著差异（P＞0.05）。

表 3　不同固液比例饲喂模式对犊牛氮消化代谢的影响（干物质基础）

Table 3　Effects of feed patterns of different solid and liquid feed ratios on N digestion and metabolism of calves (DM basis, n=18)

项目 Items	组别 Groups HL	LS	HS	SEM	P 值 P-value
断奶前 Pre-weaning					

摄入氮 N intake/［g/(kg $W^{0.75}$·d)］	1.90	1.88	1.74	0.032	0.084
粪氮 Fecal N/［g/(kg $W^{0.75}$·d)］	0.40[b]	0.48[a]	0.37[b]	0.027	0.001
尿氮 Urine N/［g/(kg $W^{0.75}$·d)］	0.63	0.63	0.64	0.048	0.969
总排出氮 Total excreted N/［g/(kg $W^{0.75}$·d)］	1.03	1.11	1.00	0.064	0.070
吸收氮 Absorbed N/［g/(kg $W^{0.75}$·d)］	1.50	1.40	1.37	0.042	0.156
沉积氮 Retained N/［g/(kg $W^{0.75}$·d)］	0.87[a]	0.77[b]	0.73[b]	0.082	0.007
氮利用率 Utilization of N/%	45.93[a]	40.90[b]	42.06[b]	0.038	0.012
氮的生物学价值 Biological value of N/%	58.00	55.00	53.45	0.041	0.080
断奶后 Post-weaning					
摄入氮 N intake/［g/(kg $W^{0.75}$·d)］	2.25	2.30	2.23	0.018	0.366
粪氮 Fecal N/［g/(kg $W^{0.75}$·d)］	0.28	0.28	0.26	0.011	0.705
尿氮 Urine N/［g/(kg $W^{0.75}$·d)］	0.79	0.63	0.59	0.040	0.073
总排出氮 Total excreted N/［g/(kg $W^{0.75}$·d)］	1.07[a]	0.91[b]	0.84[b]	0.038	0.026
吸收氮 Absorbed N/［g/(kg $W^{0.75}$·d)］	1.97	2.02	1.97	0.024	0.658
沉积氮 Retained N/［g/(kg $W^{0.75}$·d)］	1.18[b]	1.39[a]	1.39[a]	0.040	0.030
氮利用率 Utilization of N/%	52.40[b]	60.51[a]	62.48[a]	1.690	0.023
氮的生物学价值 Biological value of N/%	60.08[b]	68.88[ab]	70.78[a]	1.959	0.048

2.4 犊牛瘤胃液 pH、NH_3-N 浓度和 MCP 含量

由表 4 可知，HS 组饲喂模式下犊牛瘤胃液 pH 较低，其中 56 日龄时，HS 组显示出低于 HL 与 LS 组的趋势（P=0.061），84 日龄时 HS 和 LS 组显著低于 HL 组（P＜0.05）。与 HL 和 HS 组相比，42 日龄时 LS 组犊牛瘤胃液 NH_3-N 浓度有增高的趋势（P=0.099）。随着犊牛日龄增加，瘤胃液 MCP 含量显著提高（P＜0.05），断奶后不同组表现出差异，其中 56 日龄时，HS、LS 组有高于 HL 组的趋势（P=0.051），到 84 日龄时，HS 组显著高于 HL 组（P＜0.05）。

表 4　不同固液比例饲喂模式对犊牛瘤胃液中 pH、NH_3-N 浓度和 MCP 含量的影响

Table 4　Effects of feed patterns of different solid and liquid feed ratios on pH, NH_3-N concentration and MCP content in rumen fluid of calves (n=18)

项目 Items	日龄 Days of age/d	组别 Groups			SEM	固定效应 P 值 P-values of fixed effects		
		HL	LS	HS		组别 Group	日龄 Days of age	组别×日龄 Group×days of age
pH	28～84	5.62	5.57	5.41	0.616	0.124	<0.001	0.033
	28	5.15	5.39	5.26	0.074	0.285		
	42	5.57	5.68	5.64	0.079	0.605		
	56	5.82	5.95	5.53	0.103	0.061		
	84	5.95[a]	5.26[b]	5.20[b]	0.122	0.001		
氨态氮	28～84	4.32	4.58	4.14	0.616	0.610	<0.001	0.574
NH_3-N/(mmol/L)	28	2.47	3.19	2.78	0.284	0.367		
	42	4.66	5.99	4.70	0.313	0.099		
	56	3.14	2.58	2.68	0.293	0.489		

	84	7.00	6.55	6.38	0.373	0.439		
微生物蛋白	28～84	1.78	1.93	1.98	0.610	0.227	<0.001	0.239
MCP/(mg/mL)	28	1.09	1.01	0.99	0.060	0.625		
	42	1.83	1.89	1.77	0.089	0.569		
	56	1.81	2.13	2.23	0.092	0.051		
	84	2.40[b]	2.70[ab]	2.94[a]	0.104	0.013		

2.5 犊牛瘤胃液 VFA 含量

由表 5 可知，不同饲喂模式对断奶后犊牛瘤胃液 VFA 含量产生了一定的影响，同时随着犊牛日龄的增加总挥发性脂肪酸（TVFA）浓度显著提高（P＜0.05）。56 日龄时 HS 组 TVFA 浓度显示出高于 LS 组的趋势（P=0.087），84 日龄时 HS 及 LS 组显著高于 HL 组（P＜0.05）；而其他日龄各组间无显著差异（P>0.05）。56 日龄时，LS 组乙酸比例有低于其他组的趋势（P=0.082）；另外 84 日龄时，HS 组犊牛瘤胃液中乙酸、丁酸比例及显著高于其他 2 组（P＜0.05），乙酸/丙酸显著高于 HL 组（P＜0.05）。戊酸比例在犊牛断奶前后不受饲喂模式的影响（P>0.05）。

表 5　不同固液比例饲喂模式对犊牛瘤胃液 VFA 浓度的影响

Table 5　Effects of feed patterns of different solid and liquid feed ratios on VFA concentration in rumen fluid of calves (n=18)

项目 Items	日龄 Days of age	组别 Groups			SEM	固定效应 P 值 P-values of fixed effects		
		HL	LS	HS		组别 Group	日龄 Days of age	组别×日龄 Group×days of age
总挥发性脂肪酸	28～84	36.31[b]	37.23[b]	41.54[a]	0.616	0.044	<0.001	0.049
TVFA/(mmol/L)	28	29.74	32.81	36.92	2.276	0.193		
	42	35.94	31.23	31.05	1.707	0.373		
	56	40.79	34.40	43.91	1.650	0.087		
	84	42.75[b]	53.16[a]	54.29[a]	3.259	0.006		
乙酸	28～84	20.63[b]	19.50[b]	23.02[a]	0.616	0.044	<0.001	0.342
Acetate/%	28	18.69	17.67	21.09	1.282	0.249		
	42	19.24	17.05	17.81	1.038	0.459		
	56	22.23	18.13	23.34	0.845	0.082		
	84	22.36[b]	25.13[ab]	29.82[a]	1.675	0.014		
丙酸	28～84	9.89	10.61	11.01	0.615	0.469	<0.001	0.218
Propionate/%	28	9.96	10.85	11.32	0.721	0.454		
	42	9.08	7.81	7.31	0.533	0.329		
	56	12.33	11.20	13.27	0.598	0.081		
	84	12.18	12.59	13.14	1.029	0.532		
丁酸	28～84	4.22	4.13	5.17	0.616	0.070	<0.001	0.117

Butyrate/%	28	2.96	2.76	3.21	0.450	0.689		
	42	5.05	3.99	3.72	0.386	0.236		
	56	4.35	3.70	5.37	0.331	0.142		
	84	4.52[b]	6.06[b]	8.38[a]	0.673	0.001		
戊酸	28～84	1.28	1.47	1.66	0.616	0.121	<0.001	0.067
Valerate/%	28	0.84	0.85	0.77	0.086	0.843		
	42	1.46	1.67	1.42	0.132	0.503		
	56	1.31	1.00	1.47	0.111	0.212		
	84	2.50	2.36	2.96	0.266	0.235		
乙酸/丙酸	28～84	2.19	1.90	2.19	0.616	0.140	<0.001	0.033
Acetate/propionate	28	1.64	1.66	1.88	0.081	0.463		
	42	2.31	2.21	2.58	0.189	0.269		
	56	1.85	1.65	1.78	0.065	0.545		
	84	1.84[b]	2.06[ab]	2.52[a]	0.159	0.008		

3 讨 论

3.1 不同固液比例饲喂模式对犊牛能量和氮消化代谢的影响

胃肠道对固液饲料中营养物质的消化利用及吸收水平会直接影响犊牛断奶前后的生长性能[15]。Jasper 等[16]与 Anderson 等[17]的试验中分别通过增加液体饲料饲喂量及添加固体颗粒料饲喂量发现，液体饲料采食量的增加有助于提高犊牛断奶前的营养物质表观消化率，而固体颗粒料的添加则具有提高断奶后营养物质表观消化率的作用。从本试验可以看出，断奶前，不同固液比例条件下犊牛总 DMI 无显著差异，HL 组 GE 表观消化率和氮利用率较高，与 Khan 等[18]的研究结果一致。这一阶段犊牛对营养物质的消化吸收过程中对皱胃的依赖性较强，液体饲料采食量较高且液体饲料采食持续时间较长时，大量的液体饲料到达皱胃后，由皱胃分泌的凝乳酶、蛋白酶、淀粉酶等对液体饲料进行消化吸收。另外，与液体营养物质吸收相关的内分泌激素，如胰岛素、胰岛素样生长因子 1 等可以激发肠道局部反应，刺激肠道吸收，从而提高了营养物质的代谢能。而在此期间犊牛瘤胃尚未发育，固体饲料到达瘤胃后，营养物质不能被充分吸收，从而导致了高固体饲料饲喂下消化能较低。从氮的消化利用结果可以看出，液体代乳粉饲喂量增加显著提高了断奶前犊牛沉积氮和氮利用率，与许先查等[19]的研究结果一致。

断奶后，固体饲料的采食对犊牛采食量具有积极的促进作用，Di Giancamillo 等[20]发现饲喂固体饲料的犊牛大部分时间采食饲料和反刍，而只饲喂液体饲料的犊牛则多数时间在舔舐它可以接触到的任何物品，因此足量固体饲料的采食能够促进断奶后犊牛 DMI 的增加。本试验结果也表明，高固体比例饲喂模式下，断奶后犊牛的 DMI 显著提高。另外，断奶后，

瘤胃承担主要的消化作用，哺乳期固体饲料饲喂量较高时，犊牛瘤胃发育较为完善，采食量明显增长，并通过刺激胃肠道促进消化酶的分泌或提高酶活性从而提高碳水化合物的消化吸收，降低尿能，提高 GE 表观消化率和 GE 代谢率。从本试验还可以看出，哺乳期饲喂高比例固体饲料，可以使断奶后（63～84 日龄）总排出氮减低，沉积氮、氮利用率以及氮的生物学价值提高，原因可能是固体饲料消化及吸收较好促进了犊牛胃肠道微生物的发育，进而改善了胃肠道代谢活动，结合断奶后 MCP 含量的变化，原因可能是，固体饲料增加了胃肠道内的多种蛋白质分解菌的数量，可以更多地将饲粮中 CP 降解合成为 MCP，胃肠道消化酶的活性也较高，各种消化酶与代谢产物间相互作用，改善氨基酸等的平衡，从而提高氮利用率，减少粪尿中氮的排出。结合能量与氮的消化代谢结果可以发现，高固体比例饲喂在犊牛断奶后促进了机体对能量和氮的利用。

3.2　不同固液比例饲喂模式对犊牛瘤胃发酵的影响

瘤胃液中 pH、NH_3-N 和 VFA 浓度作为反刍动物瘤胃发酵的重要指标，反映了瘤胃功能和瘤胃内环境的稳定性。本试验中，提高断奶前犊牛固体饲料的饲喂量，可降低断奶前后犊牛瘤胃液 pH，这与仁瑞清[21]改变饲喂模式对犊牛瘤胃液 pH 研究的结果一致。固体饲料聚集在瘤胃发酵产酸，从而降低了瘤胃液 pH。瘤胃液 pH 并不直接影响瘤胃的发育，但 Krehbiel 等[22]研究发现，它可以通过改变瘤胃液中丁酸的比例从而引起各 VFA 比例的变化，作为瘤胃发育的最佳刺激物，丁酸的吸收也伴随着瘤胃液 pH 的下降而增加[23]。而瘤胃液 pH 会直接影响瘤胃上皮细胞对 VFA 的吸收和代谢，从而间接影响瘤胃发育。可见在正常的生理范围内，丙酸、丁酸浓度提高不但会导致较低的瘤胃液 pH，而且能够加强瘤胃上皮对它们的吸收，这将有利犊牛瘤胃的迅速发育[23]。

瘤胃液中 NH_3-N 是保证瘤胃 MCP 合成效率的首要条件，其浓度动态变化反映了瘤胃中蛋白质降解与 MCP 合成的动态平衡关系[24]。瘤胃液内 NH_3-N 浓度在 2 mmol/L 即可满足瘤胃微生物合成蛋白的需要[25]，本试验结果中瘤胃液 NH_3-N 浓度处于 2.47～7.00 mmol/L，符合瘤胃微生物的生长条件，且断奶后犊牛瘤胃液 NH_3-N 浓度要显著低于断奶前，与 Anderson 等[17]研究结果一致。初生犊牛瘤胃功能尚未发育完全，随着日龄增加，瘤胃发育成熟以及微生物菌群逐渐建立，瘤胃微生物在增殖的过程中，将更多的 NH_3-N 转化为 MCP[26]，降低了 NH_3-N 浓度，这也正好解释了随着犊牛日龄的增加瘤胃液 MCP 含量增加的现象。瘤胃中

MCP 可为反刍动物提供 50%～80%的小肠可吸收蛋白质[27]，其在瘤胃的合成主要与微生物可利用能量与蛋白质相关。增加固体饲料饲喂比例，提高了断奶后期犊牛瘤胃 MCP 的合成，说明该饲喂模式可以促进瘤胃微生物对饲粮中的能量和蛋白质的利用，与本代谢试验结果中饲喂高比例固体饲料时能量及氮代谢变化情况相符合，也证实其有助于提高犊牛营养物质消化利用。由此表明，提高固体饲料饲喂比例对瘤胃液 NH_3-N 浓度无影响的同时，提高了瘤胃微生物对饲粮中蛋白质的利用。

3.3　不同固液比例饲喂模式对犊牛瘤胃发酵产物的影响

从本试验可以发现，随着犊牛日龄的增加瘤胃液 TVFA 浓度显著提高，这与张海涛等[28]的研究结果相一致，其中乙酸、丙酸、丁酸为主要组成成分，VFA 作为反刍动物瘤胃内碳水化合物发酵的重要产物，其浓度是由发酵产量、发酵速度、瘤胃上皮吸收速度和瘤胃排空速度决定，是衡量瘤胃发育成熟度的重要指标[29]。其代谢也反映了瘤胃上皮细胞的发育水平。30 日龄犊牛的短链脂肪酸代谢水平相当于成年牛的 40%，而 60 日龄犊牛的短链脂肪酸代谢水平接近成年牛[2]，即犊牛在 60 日龄前瘤胃内 VFA 随着日龄的增长逐渐增加。VFA 是刺激瘤胃发育的关键因素，随着犊牛采食固体饲料的逐渐增加，犊牛瘤胃功能逐渐发育完善，同时断奶后犊牛瘤胃发酵状况逐渐改善，其中 84 日龄饲喂高固体比例饲料的犊牛瘤胃液 TVFA 浓度达到 54.29 mmol/L，与饲喂高比例液体饲料的犊牛相比，乙酸、丙酸比例及 TVFA 浓度分别提高了 33.36%、48.41%、和 40.10%。这与 Ghorbani 等[24]通过限制液体采食量来提高犊牛固体饲料采食量后，显著增加了瘤胃液 TVFA 浓度的研究结果一致，这是因为固体饲料的饲喂不但能为瘤胃提供必要的化学刺激，也能提供一定的物理刺激，最终促进 VFA 的产生或浓度的增加。其中乙酸在参与三羧酸循环的过程中被分解为 CO_2 和 H_2O 同时释放出 ATP 来供应能量[30]，丙酸则作为唯一的生糖 VFA[31]，作用于糖异生过程，促进饲粮中营养物质的高效利用。另外，高固体饲料饲喂模式下，丁酸的比例也显著增加，且断奶后仍有增长。丁酸在经瘤网胃壁吸收的过程中，大部分转变为 β-羟丁酸而作为几种体组织尤其是肌肉组织的能量来源，其对于幼龄反刍动物的瘤胃发育也至关重要，不仅可以促进瘤胃上皮细胞增殖和分化[32]，还可以提高胃肠道敏感性和促进肠道蠕动。在固体饲料刺激下，瘤胃内微生物相互作用刺激瘤胃微生物快速繁殖，使丁酸比例大量增加，这也解释了高固体饲料饲喂的犊牛，瘤胃内 pH 降低的原因。

固体饲料的采食状况关系到犊牛整个生长时期尤其是断奶后的营养物质吸收及代谢状况。吴端钦等[33]研究表明，用固体颗粒料来代替部分代乳粉对奶公犊牛进行饲喂可以促进犊牛的健康生长。本试验结果中，高比例的固体饲料进入犊牛瘤胃，通过发酵能够产生较多挥发性的脂肪酸，改善瘤胃发酵环境，刺激犊牛的复胃特别是瘤胃的发育，进而提高营养物质中能量及氮利用率，从而减少营养物质损耗。

4 结 论

① 适量增加固体饲料饲喂比例有助于改善断奶前后犊牛瘤胃发酵，促进瘤胃 MCP 的合成，提高断奶后犊牛饲粮能量代谢率、氮的生物学价值及氮利用率。

② 采用高固体饲料饲喂模式，犊牛在42日龄固体饲料采食量达到1.0 kg/d并实施断奶具有一定优势。

参考文献：

[1] BERENDS H,VAN DEN BORNE J J G C,STOCKHOFE-ZURWIEDEN N,et al.Effects of solid feed level and roughage-to-concentrate ratio on ruminal drinking and passage kinetics of milk replacer,concentrates,and roughage in veal calves[J].Journal of Dairy Science,2015,98(8):5621–5629.

[2] VI R L B,MCLEOD K R,KLOTZ J L,et al.Rumen development,intestinal growth and hepatic metabolism in the pre- and postweaning ruminant[J].Journal of Dairy Science,2004,87(Suppl.):E55–E65.

[3] KRISTENSEN N B,SEHESTED J,JENSEN S K,et al.Effect of milk allowance on concentrate intake,ruminal environment,and ruminal development in milk-fed Holstein calves[J].Journal of Dairy Science,2007,90(9):4346–4355.

[4] SUÁREZ B J,VAN REENEN C G,STOCKHOFE N,et al.Effect of roughage source and roughage to concentrate ratio on animal performance and rumen development in veal calves[J].Journal of Dairy Science,2007,90(5):2390–2403.

[5] VAZQUEZ-ANON M,HEINRICHS A J,ALDRICH J M,et al.Postweaning age effects on rumen fermentation end-products and digesta kinetics in calves weaned at 5 weeks of age[J].Journal of Dairy Science,1993,76(9):2742–2748.

[6] WELCHMAN D D,BAUST G N.A survey of abomasal ulceration in veal calves[J].Veterinary

Record,1987,121(25/26):586–590.

[7] 戚建允,李妍.犊牛早期断奶的饲养管理工作实践[J].中国奶牛,2011(21):36–37.

[8] 许先查,刁其玉,王建红,等.液态饲料饲喂量对0～2月龄犊牛生长性能的影响[J].畜牧与兽医,2011,43(2):4–8.

[9] AOAC.Official methods of analysis of the association of official analytical chemists[M].17th ed.Arlington:AOAC,2000.

[10] 张丽英.饲料分析及饲料质量检测技术[M].3版.中国农业大学出版社,2007.

[11] DENG K D,JIANG C G,TU Y,et al.Energy requirements of Dorper crossbred ewe lambs[J].Journal of Animal Science,2014,92(5):2161–2169.

[12] CAO Y C,YANG H J.Ruminal digestibility and fermentation characteristics *in vitro* of fenugreek and alfalfa hay combination with or without the inoculation of *Neocallimastix* sp. YAK11[J].Animal Feed Science and Technology,2011,169(1/2):53–60.

[13] VERDOUW H,VAN ECHTELD C J A,DEKKERS E M J.Ammonia determination based on indophenol formation with sodium salicylate[J].Water Research,1978,12(6):399–402.

[14] MAKKAR H P S,SHARMA O P,DAWRA R K,et al.Simple determination of microbial protein in rumen liquor[J].Journal of Dairy Science,1982,65(11):2170–2173.

[15] BERENDS H,VAN DEN BORNE J J G C,MOLLENHORST H,et al.Utilization of roughages and concentrates relative to that of milk replacer increases strongly with age in veal calves[J].Journal of Dairy Science,2014,97(10):6475–6484.

[16] JASPER J,WEARY D M.Effects of Ad libitum milk intake on dairy calves[J].Journal of Dairy Science,2002,85(11):3054–3058.

[17] ANDERSON K L,NAGARAJA T G,MORRILL J L,et al.Ruminal microbial development in conventionally or early-weaned calves[J].Journal of Animal Science,1987,64(4):1215–1226.

[18] KHAN M A,LEE H J,LEE W S,et al.Structural growth,rumen development,and metabolic and immune responses of Holstein male calves fed milk through step-down and conventional methods[J].Journal of Dairy Science,2007,90(7):3376–3387.

[19] 许先查,刁其玉,屠焰,等.液体饲料饲喂量对哺乳期犊牛生长性能、消化代谢的影响[J].饲料工

业,2010,31(19):47–50.

[20] DI GIANCAMILLO A,BOSI G,ARRIGHI S,et al.The influence of different fibrous supplements in the diet on ruminal histology and histometry in veal calves[J].Histology and Histopathology,2003,18(3):727–733.

[21] 仁瑞清.不同饲喂模式对犊牛生长以及胃肠道发育的影响[D].硕士学位论文.保定:河北农业大学,2012.

[22] KREHBIEL C R,HARMON D L,SCHNEIDER J E.Effect of increasing ruminal butyrate on portal and hepatic nutrient flux in steers.[J].Journal of Animal Science,1992,70(3):904–914.

[23] BALDWIN R L,MCLEOD K R.Effects of diet forage:concentrate ratio and metabolizable energy intake on isolated rumen epithelial cell metabolism *in vitro*[J].Journal of Animal Science,2000,78(3):771–783.

[24] GHORBANI G R,MORGAVI D P,BEAUCHEMIN K A,et al.Effects of bacterial direct-fed microbials on ruminal fermentation,blood variables,and the microbial populations of feedlot cattle[J].Journal of Animal Science,2002,80(7):1977–1985.

[25] CLARK K J,TAMBORELLO T J,XU Z C,et al.An unusual group-A rotavirus associated with an epidemic of diarrhea among three-month-old calves[J].Journal of the American Veterinary Medical Association,1996,208(4):552–554.

[26] CROCKER L M,DEPETERS E J,FADEL J G,et al.Influence of processed corn grain in diets of dairy cows on digestion of nutrients and milk composition[J].Journal of Dairy Science,1998,81(9):2394–2407.

[27] STORM E,ØRSKOV E R.The nutritive value of rumen micro-organisms in ruminants.1.Large-scale isolation and chemical composition of rumen micro-organisms[J].British Journal of Nutrition,1983,50(2):463–470.

[28] 张海涛,王加启,卜登攀,等.影响犊牛瘤胃发育的因素研究[J].乳业科学与技术,2008,31(2):86–89.

[29] 云强.蛋白水平及Lys/Met对断奶犊牛生长、消化代谢及瘤胃发育的影响[D].硕士学位论文.北京:中国农业科学院,2010.

[30] 翁秀秀.饲喂不同日粮奶牛瘤胃发酵和VFA吸收特性及其相关基因表达的研究[D].博士学位论文.兰州:甘肃农业大学,2013.

[31] REYNOLDS C K,AIKMAN P C,LUPOLI B,et al.Splanchnic metabolism of dairy cows during the transition from late gestation through early lactation[J].Journal of Dairy Science,2003,86(4):1201–1217.

[32] 杨春涛,刁其玉,曲培滨,等.热带假丝酵母菌与桑叶黄酮对犊牛营养物质代谢和瘤胃发酵的影响[J].动物营养学报,2016,28(1):224–234.

[33] 吴端钦,贺志雄,谭支良.瘤胃微生物脂肪代谢的研究进展[J].华北农学报,2011,26(Supp1.2):235–238.

Effects of Different Feed Patterns of Solid and Liquid Feed Ratios on Nutrient Metabolism and Rumen Fermentation of Pre- and Post-Weaning Calves

MA Junnan[1] DIAO Qiyu[1] QI Zhiguo[2] ZHOU Kaidi[3] YANG Chuntao[1] BI Yanliang[1] TU Yan[1*]

(1．*Key Laboratory of Feed Biotechnology of Ministry of Agriculture, Beijing Key Laboratory for Dairy Cow Nutrition, Feed Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing* 100081, *China*; 2. *Animal Husbandry and Veterinary Station of Beijing, Beijing* 100110, *China*; 3. *Beijing University of Agriculture, Beijing* 102206, *China*)

Abstract: This experiment was conducted to search for a new way to wean for calves through evaluating the effects of different feeding patterns (solid and liquid feed ratios) on nutrient metabolism and rumen fermentation of pre- and post-weaning calves． Thirty-six Holstein bull calves aged 7 days were used and assigned to one of the three groups with 12 calves each. The nutritional ingredients in solid and liquid feeds in groups were the same. Three feeding patterns were set with similar total dry matter intake and verifying solid and liquid feed ratios. High liquid feed ratio (HL) group: solid and liquid feed ratio was kept at 1:2 during 28 to 56 days of age, and calves were weaned at 56 days of age. Control (LS) group: solid and liquid feed ratio varied from 1:2 to 1:1 during 28 to 56 days of age, and calves were weaned at 56 days of age. High solid feed ratio (HS) group：of solid and liquid feed ratio varied from 1:2 to 1:0 during 28 to 42 days of age,

and calves were weaned at 42 days of age. The trial lasted for 77 days. Rumen fluid was collected at 28, 42, 56 and 84 days of age，digestion and metabolism trials were conducted at 35 and 63 days of age，respectively． The results showed as follows：compared with HS group，metabolizability of GE of pre-weaning calves in HL and LS groups were higher, but the difference was not significant （P＞0. 05）； compared with HL group， metabolizability of digestive energy, nitrogen utilization and energy and nitrogen biological value of post-weaning calves in HS group were significantly increased (P＜0.05). Compared with HL group, microbial protein content in rumen fluid of calves at 84 days of age in HS group were significantly increased (P＜0.05). The concentration of ammonia nitrogen was not impacted by treatments (P＞0.05). Total volatile fatty acid concentration and butyrate proportion in rumen fluid of calves at 84 days of age in HS group were significantly higher than those in HL group (P＜0.05), and propionate and pentanoate proportions were not significantly affected (P＞0.05)． In conclusion， the increase of solid feed at proper ratio can help to improve rumen fermentation, increase microbial protein synthesis, and increase metabolizability of energy, nitrogen biological value and nitrogen utilization for post-weaning calves; under high solid feed feeding pattern, there is some advantages to wean at 42 days of age when solid feed intake reached 1.0 kg/d．

Key words: calf; solid and liquid feed ratio; microbial protein; nutrient metabolism; rumen fermentation